

Kozmikus mállás szimulációs vizsgálata besugárzott meteoritok alapján

GYOLLAI Ildikó^{1,4}, RÁCZ Richárd², BIRI Sándor², JUHÁSZ Zoltán², KERESZTURI Ákos^{3,4,5}, KIRÁLY Csilla^{4,6},
REZES Dániel^{3,4}, SULIK Béla², SZABÓ Máté^{1,4}, SZALAI Zoltán^{4,5,6}, SZÁVAI Péter^{4,6}

¹Földtani és Geokémiai Intézet, HUN-REN Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, Budapest, 1121, Budaörsi út 45., ²HUN-REN Atommagkutató Intézet, Debrecen, Bem tér 18/c, H-4026, ³Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet, HUN-REN Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, Budapest, 1121, Konkoly Thege Miklós út 15–17., ⁴CSFK, MTA Kiváló Kutatóhely Budapest, 1121, Konkoly Thege Miklós út 15–17. ⁵Eötvös Loránd Tudományegyetem, (ELTE) Budapest, Hungary, ⁶Földrajztudományi Intézet, HUN-REN Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, Budapest 1121, Budaörsi út 45.

Simulation of space weathering by the analysis of irradiated meteorites

Abstract

Raman and infrared spectroscopic measurements were performed on a CO3-type carbonaceous chondrite sample designated NWA 10580, at identical measurement points before and after three successive proton irradiation cycles. To simulate cosmic weathering under laboratory conditions, the sample was irradiated with 1 keV protons at flux values of 10^{11} , 10^{14} , and 10^{17} ions/cm₂ for each experimental cycle. Following irradiation, the Raman spectroscopic measurements revealed changes in the full width at half maximum (FWHM) and peak positions of the main spectral bands. In both the Raman and FTIR spectra, several low-intensity bands (663, 697, 913 cm⁻¹) of piroxén (FTIR), and 658 cm⁻¹ piroxén (Raman), while for olivine 978 cm⁻¹ (FTIR) disappeared after irradiation. In the infrared region the pyroxene bands exhibited both positive [at smaller peaks (664 cm⁻¹: +3 cm⁻¹, 913 cm⁻¹: +1 cm⁻¹)] and negative peak shifts, whereas olivine primarily showed negative peak shifts (894 cm⁻¹: -7 cm⁻¹, 978 cm⁻¹: -8 cm⁻¹) and, in several cases, the disappearance of minor peaks. The loss of these low-intensity peaks in both the infrared and Raman spectra indicates amorphization of the respective mineral phases. The most stable spectral bands identified in this way may contribute to the future optimization of detector systems on space probes, as well as to the correlation of meteorite samples with their parent asteroids.

Keywords: meteorite, space weathering, proton irradiation, FTIR spectroscopy, Raman spectroscopy

Összefoglalás

Az NWA 10580 jelű, CO3 típusú szenes kondritmintán, azonos mérési pontokon Raman- és infravörös spektroszkópiai méréseket végeztünk három, egymást követő protonbesugárzási ciklust megelőzően, valamint azokat követően. A kozmikus mállás laboratóriumi körülmények közötti szimulálásához 1 keV energiájú protonokat alkalmaztunk, kísérletenként 10^{11} , 10^{14} és 10^{17} ion/cm₂ fluxus értékekkel. A besugárzásokat követően a Raman-spektroszkópiai mérések során megfigyelhető a fő csúcsok félértékszélességének (FWHM) és csúcspozícióinak változása. A Raman- és FTIR-spektrumokban az olivín és a piroxén esetében több alkalommal is eltűntek a kisebb intenzitású csúcsok (663, 697, 913 cm⁻¹) a piroxénél (FTIR), és 658 cm⁻¹ a piroxénél (Raman), valamint olivinnél 978 cm⁻¹ (FTIR) pozícióban. A piroxén infravörös tartományban megjelenő csúcsainál egyaránt kimutathatók pozitív [kisebb csúcsoknál 664 cm⁻¹ (+3 cm⁻¹), 913 cm⁻¹ (+1 cm⁻¹)] és negatív irányú csúcseltolódások (1046 cm⁻¹ (-7 cm⁻¹), míg az olivínre elsősorban negatív csúcseltolódások (894 cm⁻¹: -7 cm⁻¹, 978 cm⁻¹: -8 cm⁻¹), valamint több esetben a kisebb csúcsok eltűnése jellemző. Utóbbi mind az infravörös, mind a Raman-spektrumokban az adott ásványfázisok amorfizációjára utal. Az ily módon azonosított, leginkább stabil csúcsok kiválasztása hozzájárulhat a jövőbeni űrszondák detektorrendszerének optimalizálásához, valamint a meteoritminták kisbolygókhoz való kapcsolásához.

Tárgyszavak: meteorit, kozmikus mállás, protonbesugárzás, FTIR-spektroszkópia, Raman-spektroszkópia

Bevezetés

A kozmikus mállás folyamata (BRUNETTO et al. 2015) módosítja a kisbolygók felszíni ásványtani szerkezetét azáltal, hogy csökkenti az ásványfázisok spektrális intenzitását (CHAPMAN 2004), ami megnehezíti a meteoritcsoportok és az adott kisbolygók közötti megfeleltetést (DEMEO et al. 2022, KRÁMER RUGGIU et al. 2021). A

légkörrel nem rendelkező égitestek felszínét jelentős mértékben befolyásolja a galaktikus és szoláris eredetű töltött részecskék – elsősorban protonok és alfa-részecskék – besugárzása, ezek kristályrácsba történő beépülése és a kémiai kötések felbomlása; továbbá az ultrabolyga sugárzás, a mikrometeorit-becsapódások, valamint a napi hőmérséklet-ingadozások hatása. A kozmikus mállás eredményeként aprózódás, repedéshálózatok kialakulása, részleges

olvadás és amorfizáció figyelhető meg, amelyek összességében átalakítják a kisbolygók felszínének megjelenését, ásványos és kémiai összetételét. E folyamatok részletes vizsgálata elősegíti a meteoritok eredetéről szolgáló égitestek azonosítását, ugyanakkor ehhez elengedhetetlen a klasszikus földtudományi laboratóriumi módszerek alkalmazása.

Kutatásunk célja a napszél által kiváltott kozmikus mállás hatásainak azonosítása és mélyebb megértése az NWA 10580 jelű CO3 típusú szenes kondrit meteoriton, laboratóriumi protonbesugárzási kísérletek, valamint infravörös és Raman-spektroszkópiái adatok együttes értékelésének segítségével. A tudományos megértés mellett kiemelt jelentőségű annak vizsgálata is, hogy a különböző spektrális felbontással milyen mértékben észlelhetők a karakterisztikus csúcsok – ez alapvető információt nyújt arról, hogy a jövőbeli kisbolygókutató űrszondák fedélzetén működő infravörös detektorok milyen megfigyelési képességekkel kell rendelkezzenek a kozmikus mállás nyomainak és a célpontot alkotó ásványok megbízható azonosításához.

Kozmikus mállás

A napszél energiájának hatása jelentősen befolyásolja a kozmikus mállás következményeit, és nemcsak az ionok energiaszintje, hanem a teljes észlelt dózis is kulcsszerepet játszik az átalakulásban. Az ún. fluxus-értékek reprezentálják a napszél expozíciós időskáláit (pl. DUKES et al. 1999, VERNAZZA et al. 2013, LANTZ et al. 2015, LAZZARIN et al. 2006, BRUNETTO et al. 2014). Mivel a laboratóriumi vizsgálatok időskálája jelentősen rövidebb, mint a valós expozíciós időtartamok, ezért ezeket az eltéréseket magasabb dózissal és intenzívebb besugárzással kompenzálják. A besugárzási intenzitás különböző mértékegységek segítségével jellemezhető: fluens, amely a teljes kísérlet során a vizsgált egységnyi felületre jutó ionok össz mennyiségét mutatja; a besugárzás során átadott energia teljes mennyisége; és a dózis, amely az elnyelt energia egységnyi tömegenként. A besugárzási vizsgálatokat megelőző és követő infravörös és Raman-spektrumok lehetővé teszik az ásványok változásainak nyomon követését.

Korábban Raman-spektroszkópiával különböző típusú mintákon végeztek méréseket, például olivinen (LANTZ et al. 2017), polisztirolon és olivinen (KAŇUCHOVÁ et al. 2017). LANTZ et al. (2017) a Lance-meteoriton, amelyen megfigyelték a szilikátok amorfizációját: a 850 és 820 cm^{-1} körüli olivincsúcsok intenzitása a Raman-spektrumokban a besugárzások hatására jelentősen csökkent, és néhány helyen szinte teljesen eltűntek. Ez a dupla főcsúcs az olivin Raman-spektrumának egyik meghatározó jellemzője, amely a SiO_4 tetraéderek szimmetrikus és aszimmetrikus vegyérték rezgésmódjaihoz kapcsolódik (KUEBLER et al. 2006). Emellett LANTZ et al. (2015, 2017) a Tagish Lake-, Murchison- és Lance-meteoritokban is végeztek Raman-spektroszkópiás vizsgálatokat olivinszemcséket célozva. Mindezek a

vibrációs típusok megfigyelhetők Raman-spektroszkópiával az olivin kristályszerkezetében besugárzás előtt, míg erősebb besugárzások után a csúcsetelődés és az intenzitás csökkenése a kristályszerkezet amorfizációjával hozható összefüggésbe.

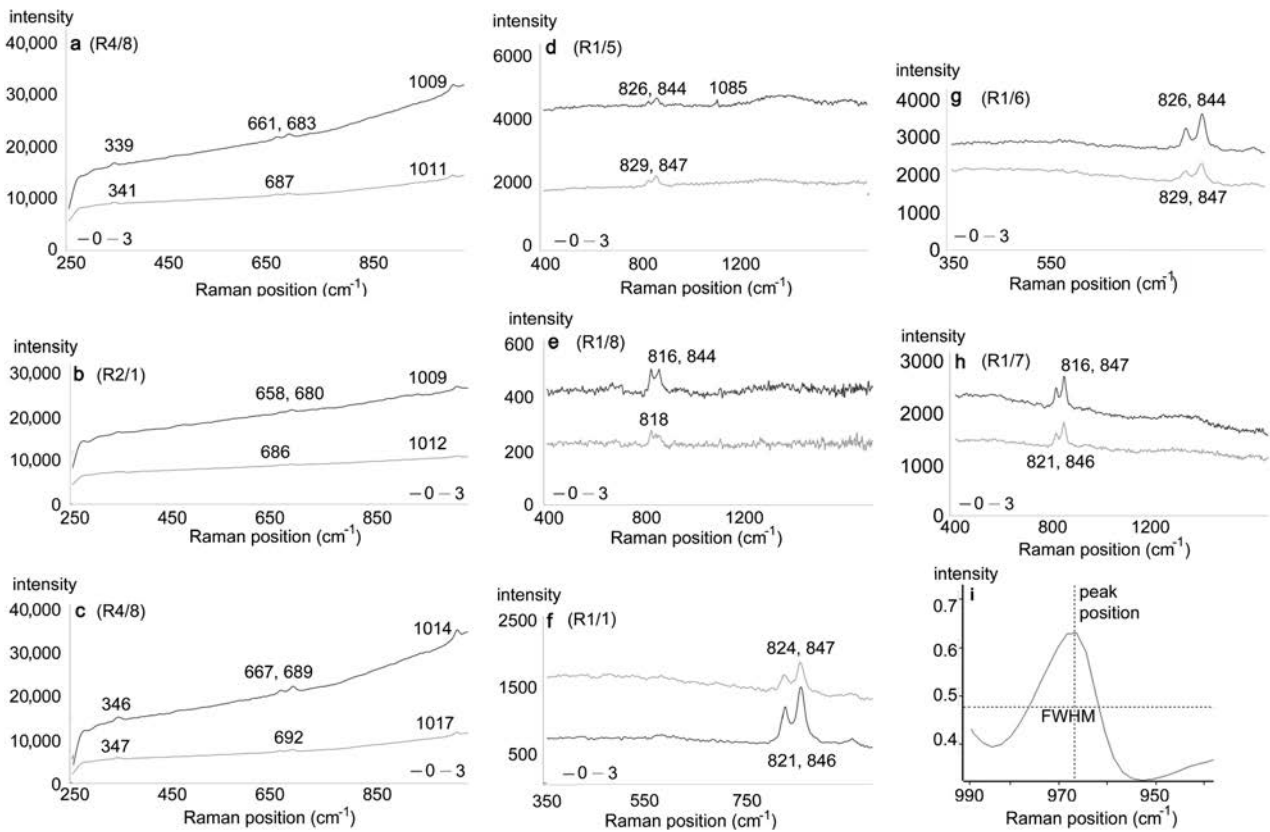
LANTZ et al. (2015) a kutatásában BRUNETTO et al. (2006, 2020) munkájához hasonlóan besugárzás hatására a szerves anyagok átalakulását (D és G csúcsok eltolódása a szerves anyagban) vizsgálta, míg IR-módszerekkel az Mg-szilikátokban történő változásokat elemezte. Éppen emiatt hiánypótló, hogy mi besugárzás hatásait ásványokban Raman-nal is vizsgáltuk, és a változásokból levont következtetéseket az irodalomban is leírt IR-változásokkal is összekapcsoltuk.

Raman-spektroszkópiával korábban inkább a sokkmeta-morf átalakulásokat írták le meteoritásványokban, ami szintén amorfizációval járt. Ez segít a besugárzás során bekövetkezett amorfizáció megértésében is, illetve a jelenség besugárzás utáni Raman-spektroszkópiái mérések interpretálásában. LANTZ et al. (2017) a Mg-tartalmú ásványok IR-elemzése (VIS-NIR, IR reflexiós mérés) mellett Raman-spektroszkópiával is vizsgálta az olivint, ahol annak a fő dubletje (820, 850 cm^{-1}) jelentős intenzitáscsökkenését („csaknem eltűnését”) észlelte besugárzás után. A mi méréseinkben is az 1/e ábrán R1/8 mérési pontban az olivin dublet 818 és 844 cm^{-1} csúcsai közül besugárzás után a 844 cm^{-1} csúcs eltűnt. LANTZ et al. (2015, 2017) a Mg-tartalmú szilikátok Mg-csökkenését észlelték, ami az IR-spektrumokban a cm^{-1} skálán a csúcspozíció csökkenését okozta, valamint a „spectral reddening” vagyis az IR-spektrumok vöröseltolódása is itt figyelhető meg.

Módszerek

A kutatás során az elemzett meteorit ugyanazon területein végeztünk méréseket minden egyes besugárzási ciklus előtt és után, hogy nyomon követhessük az ásványok fokozatos változását. A pontos összehasonlítás érdekében az IR- és Raman-mérések során 3 piroxén és 5 olivin szemcsét az NWA10580 meteoritban, kondrumokon belül és a mátrixban egyaránt. A hazai ásványtani kutatásokban is széleskörűen alkalmazott Raman-spektrumokat (KOVÁCS et al. 2014, 2015; TÓTH et al. 2012) az ásványtani jellemzők változásainak követésére alkalmaztuk, lehetővé téve az ásványok azonosítását és szerkezeti jellemzését, valamint a besugárzást követő amorfizáció megfigyelését. A szintén elterjedten alkalmazott infravörös spektrumok (LANGE et al. 2019, MOLNÁR et al. 2021) hasonló céllal készültek, de ez a módszer érzékenyebb a víztartalomra, a kristályszerkezet torzulására és a kémiai változásokra, illetve különbség van az amorfizáció azonosíthatóságában a két módszer között.

Az infravörös spektroszkópiás és mikroszkópos vizsgálatokhoz Vertex 70 FTIR spektrométert és Hyperion 2000 mikroszkópot alkalmaztunk, 15× nagyítású IR-objektívvel, reflexiós módban. A mérések során minden



I. ábra. Raman-spektrumok a mérési területek elnevezései alapján, piroxén ásványok: a (R4/9), b (R2/1), c (R4/8); olivín ásványok: d (R1/5), e (R1/8), f (R1/1), g (R1/6), h (R1/7). Megfigyelhető, hogy a besugárzást követően általános tendencia a csúcsok intenzitásának csökkenése

Figure 1. Raman spectra of several measured locations, pyroxene minerals: a (R4/9), b (R2/1), c (R4/8); olivine minerals: d (R1/5), e (R1/8), f (R1/1), g (R1/6), h (R1/7). The spectral curves demonstrate the general tendency of band weakening after the irradiations

egy helyszínen 32 szkenneléssel végeztük, 400–4000 cm^{-1} közötti spektrális tartományban, egy mérési pont esetén 30 másodperces integrálási időtartammal és közel 4 cm^{-1} spektrális felbontással. A kapott spektrumok feldolgozására a Bruker Optics Opus 5.5. szoftvert használtuk, amely lehetővé tette az alapvonal-korrekciót, valamint az atmoszférikus háttérhatások kompenzálását. Az IR 15 \times nagyítású objektív látómezeje 200 μm volt. Az egyes besugárzási ciklusokat követő mérések során a látómezőt mindig a korábban ugyanezen területen mért látómezővel megegyező területre állítottuk, amiben a mikroszkóp képernyőjének aktuális képének és annak korábbi elmentett változatának összehasonlítása segített. Ennek megfelelően azonos pontok eltérő mérései a lehetőségek szerint legjobban fedték le egymást, azaz a mérés mindig ugyanazon területről készült a felbontás szintjéig.

A Raman-spektroszkópiás méréseket a Malvern Instruments által gyártott Morphologi G3SE-ID készülékkel végeztük. A berendezés egy Kaiser Optical Systems Inc. Raman Rxn1 spektrométert tartalmazott, 785 nm hullámhosszúságú lézerral, 30 másodperces expozíciós idő mellett, 10 mW teljesítménnyel. A lézergyár által besugárzott terület 3 \times 3 μm -es volt, melyet 50-szeres nagyítás mellett jelöltük ki, a spektrális felbontás 4 cm^{-1} volt. A Raman-spektrumok beolvasásához és értékeléséhez a Bio-Rad KnowItAll ID Expert és Morphologi szoftvereket

alkalmaztuk. Az ásványok összehasonlító spektrumait a RRUFF adatbázisból importáltuk (LAFUENTE et al. 2015). A fenteknek megfelelően a Raman- és infravörös mérések látómezeje nem teljesen egyezett meg.

A mérések során két fő paramétert határoztunk meg: a csúcspozíciót és a félértékszélességet (FWHM – Full Width at Half Maximum). A csúcsejtölődásokat olyan mérési helyszíneken dokumentáltuk, ahol a besugárzás előtt és után is megfigyelhetők voltak az adott sávok, emellett mértük a csúcsok pozícióinak változását. Az FTIR mérési területeket kisbetűkkel és számokkal jelöltük („a, b, c, d” területek), míg a Raman-mérési helyszíneket nagy „R” betűkkel és számokkal (R1, R2, R3, R4 területek) azonosítottuk.

A mintát a HUN-REN Atommagkutató Intézet (ATOMKI) elektronciklotron-rezonanciás (ECR) ionforrása által generált 1 keV-os protonokkal sugároztuk be vákuumkörnyezetben három alkalommal: az első besugárzás során 15 másodpercen keresztül (10^{11} ion/ cm^2), a második besugárzás esetében 1 órán át (10^{14} ion/ cm^2), míg a harmadik besugárzásnál 1 napig (10^{17} ion/ cm^2) végeztük a besugárzást. Ennek következtében minden egyes besugárzási ciklus után a meteorit mintáján az előző besugárzások hatásai összeadódtak. A kutatás során elsősorban a nem besugárzott és a legerősebben besugárzott (harmadik besugárzás) minták közötti változásokat ele-

meztük az NWA 10580 jelű CO3 típusú, viszonylag gyakori és tipikus szenes kondrit meteorit vastag csiszolatán, illetve szeletek csiszolt felületein vizsgálva. További adtak a kérdéses meteorittal kapcsolatos vizsgálatokból egyéb munkáinkban olvashatók (KERESZTURI et al. 2024, 2025) – ebben a cikkben ezek összekapcsolása és közös értelmezése kerül bemutatásra.

A mérések során az ásványok orientációját nem vettük figyelembe, mivel viszonylag nagy területet lefedő részeket elemeztünk, amelyeknél a jellemző apró szemcseméret miatt sok (várhatóan eltérő orientációjú) szemcse együttesen járult hozzá a felvett színekpekhez.

Eredmények, ásványok azonosítása

A Raman-mérések során a kijelölt ásványok azonosítására az infravörös mérések során az ásványokat jellegzetes csúcsok segítségével, a RRUFF-adatbázis és a Crystal Sleuth-szoftver alkalmazásával (LAFUENTE et al. 2015), valamint a vonatkozó szakirodalom alapján. a következő fő csúcsokat használtuk: 1010 cm^{-1} a piroxén, valamint 819 és 840 cm^{-1} az olivin esetében. Az olivin kisebb csúcsai 950 cm^{-1} -nél, míg a piroxén kisebb csúcsai 340, 660 és 680 cm^{-1} körül található. A csúcsetolódásokat és az FWHM-értékeket az ásványok főbb csúcsainál elemeztük: olivin esetében a 819 és 840 cm^{-1} -es dupla fő csúcsoknál, a piroxénél pedig a 1010 cm^{-1} -es Raman-eltolódásnál. A kalcitot a besugárzás előtt 1086 cm^{-1} -nél azonosítottuk a Raman-spektrumokban, azonban a besugárzások után már nem észleltük azt.

Az ásványok amorfizációjának mértékét nemcsak a fő csúcsok, hanem a kisebb csúcsok változásai is jelzik. A kisebb, kevésbé intenzív csúcsok korábban eltűntek, mint a nagyobb intenzitású fő csúcsok. Például egy Raman-spektrum esetében megfigyelhető, hogy az olivin dupla csúcsai egyetlen csúccsá olvadtak össze a kristályszerkezet amorfizációja következtében (1/e ábra, R1/8). Általánosságban elmondható, hogy a 3. besugárzás után az ásványok (olivin, piroxén) spektrumában kevesebb csúcs figyelhető meg, mint a korábbi besugárzásoknál (2. ábra).

Raman-spektroszkópia

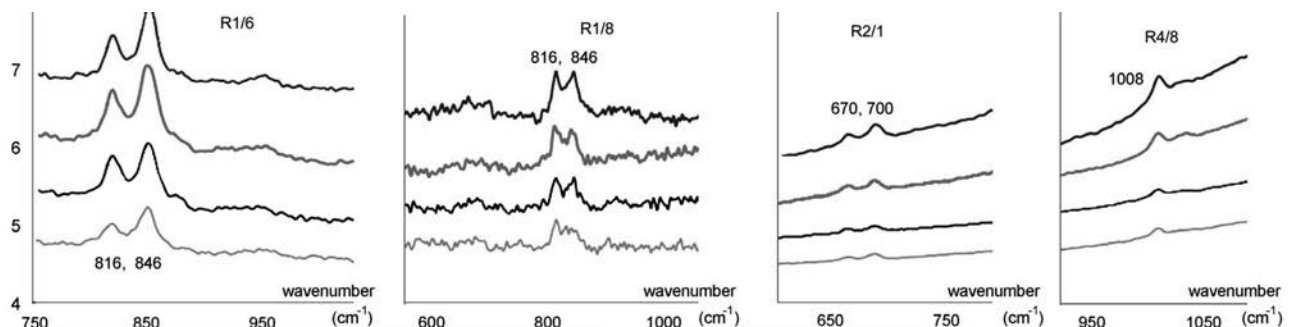
Az alábbiakban (1. ábra) jellegzetes példákat mutatunk be az eredeti (nem besugárzott) és a legerősebben besugárzott állapotok közötti Raman-csúcsváltozásokra (lásd később 4. ábra). A besugárzást követően általános tendencia figyelhető meg a Raman-csúcsok intenzitásának csökkenésében is.

A vizsgálatban megfigyelt csúcsetolódások a besugárzási fluxus növekedésével arányosan erősödtek, amely az olivin amorfizációjára utal. Az első besugárzás után (+9 cm^{-1}) és a második (+3 cm^{-1}) besugárzást követően az esetek 20%-ában, míg a harmadik besugárzás után az esetek 50%-ában (+2,5 cm^{-1}) volt kimutatható az olivin fő dupla csúcsának eltolódása egy-egy mérési területen. Az olivin esetében a harmadik besugárzást követően emelkedő FWHM-értékeket tapasztaltunk.

A piroxén esetében az 1014 cm^{-1} sáv FWHM értéke az első és második besugárzást követően növekedést, míg a harmadik besugárzást követően csökkenést mutatott. A csúcspozíció eltolódása az első besugárzást követően csökkenő trendet mutat (az esetek 60%-ában -2,5 cm^{-1}), míg a második besugárzás után az adatok 20%-ában emelkedés (+3 cm^{-1}), 80%-ában további csökkenés (-2 cm^{-1}) figyelhető meg. A harmadik besugárzást követően viszont valamennyi vizsgált mérési ponton növekvő csúcsetolódás tapasztalható, átlagosan +5 cm^{-1} mértékben.

A Raman-spektroszkópiai vizsgálatok révén a besugárzások előtt és után egyéb ásványfázisok is azonosításra kerültek, többek között agyagásványok, apatit, pirit, markazit, goethit, hematit, kromit, sziderit, kalcit és klorit, melyek a besugárzások hatására esetenként átalakulást vagy amorfizációt mutattak. A gyengébben kristályosodott földpátból, valamint a víztartalmú ásványokból (például agyagásvány, klorit, goethit) származó Raman-csúcsok a harmadik besugárzást követően eltűntek, feltehetően a víztartalom elvesztése következtében.

Az olivin (823 cm^{-1}) és a földpátfázisok egyaránt növekvő csúcspozíció-eltolódást mutatnak az első és második besugárzást követően. A harmadik besugárzás után mind a piroxén, mind az olivin növekvő csúcsetolódást mutatott, majd a földpátsávok végül eltűntek. A piroxén



2. ábra. A mérési területeken (R1/6, R1/8, R2/1, R4/8) rögzített példa Raman-spektrumok az első, második és harmadik besugárzást követően, valamint a kiindulási állapotokban (egymás alatti görbék)

Figure 2. Example Raman spectra of some locations (R1/6, R1/8, R2/1, R4/8) after the first, second and third irradiation actions together with the intact spectra (at the top)

csúcsetolódása az első és második besugárzást követően csökkenő értékeket mutat, míg a harmadik besugárzást követően növekvő tendencia figyelhető meg.

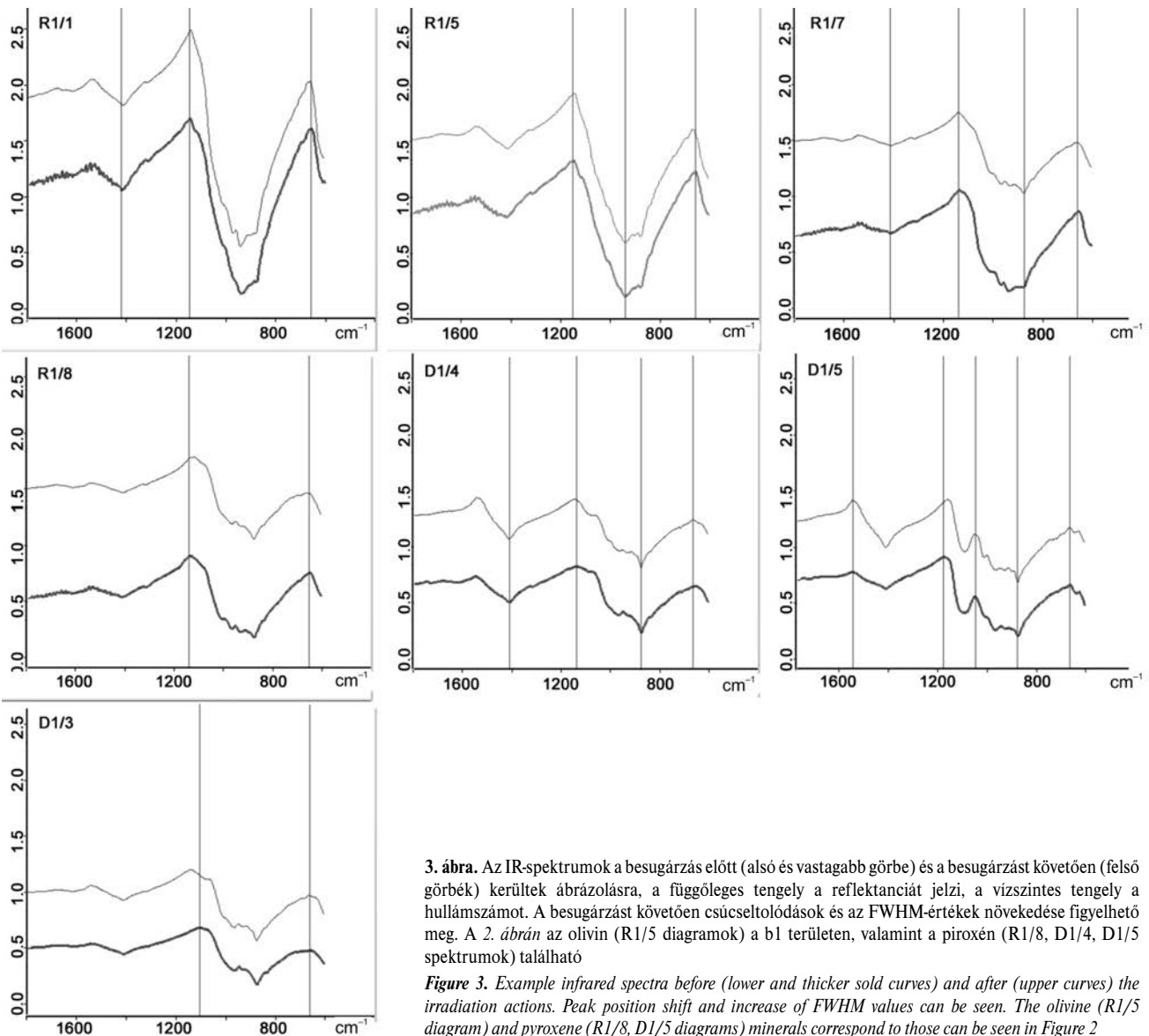
Infravörös spektroszkópia

A piroxén IR-spektruma a c1 és d1 területeken figyelhető meg (a 3. ábrán D1/3–5 diagramok, 1–2. ábrán Raman-spektrumok, 3. ábrán IR-spektrumok, R1/8, D1/3, D1/4, D1/5). A c1 területen a 703 és 667 cm^{-1} mellékcúcsok a besugárzást követően eltűntek, míg az 1046 cm^{-1} főcsúcs $+19 \text{ cm}^{-1}$ -el eltolódott a magasabb hullámszám irányába, 1064 cm^{-1} -ig. A c1 területen (b1/3 helyszín, IR/R1/7; 3. ábra), (Raman-spektrum erről a mérési pontról 1/h ábra) az olivin kisebb csúcsai jellemzően eltűntek, míg az olivin fő csúcsa csökkenő csúcsetolódást és FWHM-csökkenést mutatott a FTIR-spektrumokban. A piroxén esetében a csúcsok pozíciójában növekvő és csökkenő,

valamint az FWHM-értékek csökkenése volt megfigyelhető. A főcsúcs FWHM-értéke a három mérésből kettő esetében csökkent. A d1 területen a kisebb csúcsok, mint a 940 cm^{-1} (R4/8, R4/9 3. ábra, D1/3-4) és a 693 cm^{-1} (3. ábra, R4/9 IR/D1/5) eltűntek a besugárzást követően. Azok a kisebb csúcsok, amelyek a teljes mérési sorozaton keresztül jelen voltak (913 cm^{-1} és 660 cm^{-1}), magasabb hullámszámok felé tolódtak el ($+3 - +7 \text{ cm}^{-1}$ a 660 cm^{-1} -nél; $+1 \text{ cm}^{-1}$ a 913 cm^{-1} -nél). A piroxén fő csúcsa (1046–1064 cm^{-1}) azonban alacsonyabb hullámszámok felé tolódtott el ($-7 \dots -25 \text{ cm}^{-1}$), miközben az FWHM értékek csökkenése (átlagosan -6 cm^{-1}) volt tapasztalható.

Diszkusszió

A Raman-spektroszkópiában az olivinnek 5 vibrációhoz tartozó csúcsa van (BREITENFELD et al. 2018), ami a mi spektrumainkban is megfigyelhető: dublet 820 és 850 cm^{-1}



3. ábra. Az IR-spektrumok a besugárzás előtt (alsó és vastagabb görbe) és a besugárzást követően (felső görbék) kerültek ábrázolásra, a függőleges tengely a reflektanciát jelzi, a vízszintes tengely a hullámszámot. A besugárzást követően csúcsetolódások és az FWHM-értékek növekedése figyelhető meg. A 2. ábrán az olivin (R1/5 diagramok) a b1 területen, valamint a piroxén (R1/8, D1/4, D1/5 spektrumok) található

Figure 3. Example infrared spectra before (lower and thicker solid curves) and after (upper curves) the irradiation actions. Peak position shift and increase of FWHM values can be seen. The olivine (R1/5 diagram) and pyroxene (R1/8, D1/5 diagrams) minerals correspond to those can be seen in Figure 2

(SiO₄ tetraéderek nyújtási vibrációja), kis csúcsok 880 920, 960 cm⁻¹ pozíció (Si-O hidak nyújtási vibrációja). A piroxénnek 10 vibrációs módja van (HUANG et al. 2000), melyek közül a fő csúcsa 1005–1020 cm⁻¹ és mellékcúcsai 681 cm⁻¹ (Si-O hajlítási mód), és 420–347 cm⁻¹ (Fe/Mg/Ca-O transzlációs mód) fordulnak elő.

A Raman-csúcsok eltűnését szilikátásványok esetében leggyakrabban sokkmetamorfózis során figyelték meg (VAN DE MOORTELE et al. 2007; DURBEN et al. 1993 – olivin; HUANG et al. 2000 – piroxén; JOHNSON et al. 2003 – földpát). Hasonlót szerves anyagok esetében BRUNETTO et al. (2020) mutatták ki, míg az olivin esetében DEMYK et al. (2001) és LANTZ et al. (2017) publikáltak ilyen megfigyeléseket.

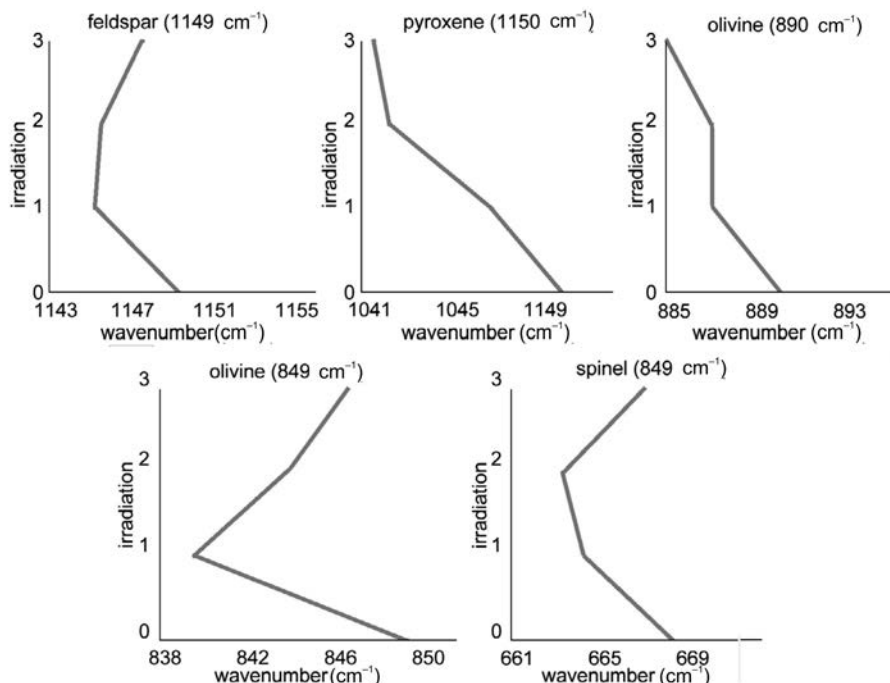
A Raman-spektrumokban a besugárzások után mind a piroxének, mind az olivinek esetében növekvő csúcs-eltolódás és az FWHM növekedése figyelhető meg, mind a fő-, mind a mellékcúcsoknál. Az olivin esetében a fő csúcs (R1/8) eltűnése 840 cm⁻¹-nél tapasztalható, míg több esetben a mellékcúcsok (660–680 cm⁻¹) eltűnése is megfigyelhető a c1 területen. Raman-spektroszkópia alkalmazásakor az olivin és a piroxén fő- és mellékcúcsai egyaránt pozitív Raman-csúcspozíció-eltolódást és az FWHM-értékek növekedését mutatják a besugárzást követően. LANTZ et al. (2017) a Lance-meteoriton végzett vizsgálataik során a szilikátok amorfizációját figyelték meg: az olivincsúcsok intenzitása (850 és 820 cm⁻¹ körül) a Raman-spektrumokban besugárzások után jelentősen csökkent, néhány esetben szinte teljesen eltűnt. A besugárzást követően egyes ásványok eltűnésére is sor került: a kalcit a besugárzás után nem mutatkozott (1. ábra

Raman, d diagram), míg az olivin Raman dupla főcsúcsai (820, 850 cm⁻¹) összeolvadtak, és egyetlen 840 cm⁻¹-es csúcsot képeztek. Ehhez hasonlóan BRUNETTO et al. (2014) nemcsak az olivin fő dubletjének eltűnését figyelték meg az Allende-meteoritban, hanem azt is, hogy a 840 cm⁻¹-es pozíción egyetlen csúcsban egyesült.

Az FTIR-vibrációkhoz tartozó referenciacsúcsokat HAMILTON et al. (2000) írta le: A piroxén fő csúcsa 1046 cm⁻¹-nél van, ami a T-O (tetraéder-oktaéder rétegek közötti) nyújtási vibrációkhoz tartozik az SiO₄ tetraédereknél. A mellékcúcsok 910 és 940 cm⁻¹-nél az Si-O hidak nyújtási vibrációjához tartoznak (4. ábra). A 700 cm⁻¹ alatti csúcsok (690, 660 cm⁻¹) 670 cm⁻¹ a kation-O híd kötésekhez tartoznak. Az olivin fő csúcsa 894 cm⁻¹ és 845 cm⁻¹-nél a Si-O kötések nyújtási és hajlítási vibrációihoz tartozik az SiO₄ tetraéderekben. A 978 cm⁻¹-nél található mellékcúcsok Si-O kötések nyújtási vibrációihoz tartoznak, a 660 cm⁻¹ környékén lévő csúcs a fém-oxigén nyújtási vibrációs módhoz tartozik.

Az infravörös mérések során az olivinben a megfigyelt mellékcúcsok többsége eltűnt, míg a fő csúcs (889 cm⁻¹) eltolódásai jellemzően -3 cm⁻¹ és -41 cm⁻¹ között mozogtak, és az FWHM értéke -6 cm⁻¹ és +4 cm⁻¹ közötti mértékben változott a besugárzások után. A negatív csúcs-eltolódások valószínűleg a kristályszerkezetből eredő Mg-vesztés következményei (LANTZ et al. 2017), míg a besugárzással összefüggő amorfizáció hatására az olivin kisebb, 978 cm⁻¹ sávja eltűnt az IR-spektrumokban (BRUNETTO et al. 2014, 2020).

A piroxénben a fő IR-csúcsok csökkenő értékű pozíciót



4. ábra. A fő FTIR-csúcspozíció-változások átlaga (vízszintes tengely) különböző besugárzások során (függőleges tengely) az egyes megfigyelt földpát, piroxén, olivin, spinel ásványok esetében

Figure 4. FTIR Peak position changes (horizontal axis) by various irradiation actions (vertical axis) for feldspar, pyroxene, olivine and spinel minerals

és változó FWHM-módosulást mutatnak. A piroxén kisebb csúcsai nem tűnnek el, azonban növekvő csúcsetolódást és növekvő FWHM-értékeket figyelhetünk meg az IR-spektrumokban. A c1 területen (2. ábra) a 703 és 667 cm^{-1} sávok eltűntek, míg a d1 területen a 940 cm^{-1} sáv szintén eltűnt a besugárzást követően. A d1 területen az FWHM változása átlagosan +20 és +93 cm^{-1} között mozog a 660 cm^{-1} csúcsnál, valamint +43 cm^{-1} a 693 cm^{-1} csúcsnál. Összegzőként elmondható, hogy a piroxén fő csúcsánál FWHM-csökkenés tapasztalható (–0 és –14 cm^{-1} között), míg a mellékcúcsok esetében az FWHM növekedése figyelhető meg.

Az olivint és a piroxént átlagosan növekvő csúcsetolódás és FWHM-változás jellemzi a főbb csúcsoknál (lásd később II. táblázat). Az FTIR-spektrumokban viszont mind az olivin, mind a piroxén esetében csökkenő átlagos csúcsetolódás és FWHM-változás figyelhető meg a fő csúcsoknál (lásd később II. táblázat).

A Raman- és az infravörös változások összehasonlítása

Az IR-spektrumokban a fő csúcsok pozíció- és FWHM-változása negatív irányúak, míg a kisebb csúcsok eltűnnek, vagy a csúcsetolódás és az FWHM változása pozitív

tendenciát mutat (I. táblázat). Ennek következményeként a besugárzás utáni amorfizáció jobban megfigyelhető a kisebb csúcsoknál, amelyek esetében a csúcsetolódás és az FWHM-változás nagyobb irányba történik, vagy a csúcsok teljesen eltűnnek, részben hasonlóan a sokkmetamorfizis során tapasztalt változásokhoz (SHARP & DE CARLI 2006, JOHNSON et al. 2003). Az FTIR-spektroszkópia alkalmazása során a besugárzást követően az FWHM változása és a csúcsetolódás közötti összefüggés egyértelműen megfigyelhető az adatainkban (III. táblázat). A besugárzás mértékének növekedésével a csúcsok magasabb hullámszám irányába tolódnak el, miközben az FWHM értékei is növekednek a Raman-spektrumokban. Ez a jelenség a kristályszerkezetben lévő rendezetlen SiO_4 tetraéderek jelenlétével magyarázható (JOHNSON et al. 2003). A kristályosodottsági fok csökkenése, a SiO_4 tetraéderek dimerizációjához (SiO_2 molekulákká való széteséséhez) vezet (JOHNSON et al. 2003). A besugárzást követően a kisebb csúcsok eltűnése, valamint a nagyobb csúcsok eltolódásának és FWHM-változásának növekedése az amorfizációval hozható összefüggésbe, így ezen megfigyelések a sokkmetamorfizmusra vonatkozó hivatkozásokban is alkalmazhatók.

A fő csúcsok negatív (csökkenő) csúcspozíció-változása arra utal, hogy az FTIR-spektrumok érzékenyebbek a magnézium veszteségére (csökkenő csúcspozíció – LANTZ

I. táblázat. Összefoglaló táblázat a kéziratban használt Raman- és infra csúcspozíciókról

Table I. Summary of the Raman and infrared peak positions used in this work

| | Raman (csúcspozíció cm^{-1}) | | | | IR (csúcspozíció cm^{-1}) | | | | |
|---------|--|------------|------------|-------------|-------------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| | 820 | 850 | 948 | | 894 | 849 | 978 | | |
| Olivin | 820 | 850 | 948 | | 894 | 849 | 978 | | |
| Piroxén | 339 | 661 | 683 | 1009 | 1046 | 940 | 913 | 693 | 660 |
| Spinell | | | | | 668 | | | | |
| Földpát | 505 | | | | 1149 | | | | |
| Kalcit | 1085 | | | | | | | | |

II. táblázat. Infravörös sávok a b1 (olivin) és c1 (piroxén), valamint d1 területeken a besugárzások előtt és után csúcsetolódás és FWHM-értékekkel. Mivel az olivin sávjai eltűntek a 3. besugárzás során, utóbbi esetben a 2. besugárzás utáni értékeket hasonlítottuk össze a Raman-eredményekkel (I. táblázat)

Table II. IR bands and FWHM values of olivine b1 area and of pyroxene at c1, and d1 areas before and after the irradiation with peak shift and change of FWHM values. Because the olivine bands disappeared after the 3rd irradiation, we use values after the 2nd irradiation for comparison of spectral changes by Raman spectroscopy (Table I)

| IR area | Raman area | Spec | Before irradiation (cm^{-1}) | FWHM (cm^{-1}) | After irradiation | FWHM (cm^{-1}) | Peak shift (cm^{-1}) | Change FWHM (cm^{-1}) |
|---------|------------|------|---|---------------------------|-------------------|---------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| (b1/2) | R1/1 | 1 | 978, 894 | 7, 11 | 970, 845 | 11, 11 | -8, -39 | +4, 0 |
| (b1/2) | R1/5 | 2 | 978, 894 | 7, 11 | 887 | 6 | d, -7 | d, -5 |
| (b1/2) | R1/6 | 3 | 978, 894 | 7, 11 | 891 | 5 | d, -3 | d, -6 |
| (b1/2) | R1/7 | 5 | 894 | 11 | 887 | 5 | -7 | -6 |
| (b1/2) | R1/8 | 6 | 894 | 14 | 853, 970 | 11, 12 | -41, p | -3, p |
| c1 | R2/1 | 2 | 1046, 703, 667 | 26, 7, 16 | 1065 | 21 | +19, d, d | -5, d, d |
| d1 | R4/8 | 4 | 1046, 940, 913, 693, 660 | 31, 8, 7, 10, 7 | 1039, 914, 667, | 31, 50, 100 | -7, d, +1, d, +7 | 0, d, +43, +93 |
| d1 | R4/9 | 5 | 1064, 945, 664 | 40, 10, 80 | 1039, 667, | 26, 100 | -25, d, +3 | -14, d, +20 |

III. táblázat. Raman-csúcspozíciók és FWHM-értékek a besugárzások előtt és után, ahol az eltolódásoszlop mutatja a változást. Rövidítések: d = Raman-csúcs eltűnése, csúcspozíciók és FWHM-értékek nem számíthatók ezekre az esetekre

Table III. Summary of Raman band positions with FWHM before and after the irradiation. Acronyms: d = disappearance of Raman bands, hence peak shift and FWHM change cannot be calculated there. The peak shift column shows the change of the positions of the indicated peaks

| IR area | Raman area | No. of spec | Raman band positions before irradiation (cm ⁻¹) | FWHM (cm ⁻¹) | Raman band positions after the 3 rd irradiation (cm ⁻¹) | FWHM (cm ⁻¹) | Peak shift (cm ⁻¹) | Change FWHM (cm ⁻¹) |
|---------|------------|-------------|---|--------------------------|--|--------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| (b1/2) | R1/1 | 1 | 821, 846, 954 | 8, 15, 8 | 824, 847, 960 | 11, 18, 13 | +3, +1, +6 | +3, +3, +5 |
| (b1/2) | R1/5 | 2 | 826, 844, | 12, 22, | 829, 847, | 14, 24, | +3, +3, | +2, +2, |
| (b1/2) | R1/6 | 3 | 826, 844, 948 | 6, 10, 17 | 829, 847, 955 | 12, 16, 23 | +3, +3, +7 | +6, +6, +6 |
| (b1/2) | R1/7 | 5 | 816, 847 | 11, 15 | 820, 850 | 16, 22 | +4, +3 | +5, +6 |
| (b1/2) | R1/8 | 6 | 816, 844 | 8, 9 | 818, d | 12, d | +2, d | +4, d |
| c1 | R2/1 | 2 | 658, 680, 1009 | 20, 13, 9 | d, 686, 1012 | d, 22, 14 | d, +6, +3 | d, +9, +5 |
| d1 | R4/8 | 4 | 346, 667, 689, 1014 | 14, 10, 21, 20 | 347, d, 692, 1017 | 25, d, 30, 28 | +1 d, +3, +3 | +11, +9, +8 |
| d1 | R4/9 | 5 | 339, 661, 683, 1009 | 22, 14, 21, 20 | 341, d, 687, 1011 | 25, d, 28, 23 | +2, d, +4, +2 | +3, d, +7, +3 |

et al. 2017), míg a Raman-spektroszkópia (a fő csúcs pozitív eltolódása) érzékenyebb a szerkezeti változásokra (például az SiO₄ tetraéderek depolimerizációja, ami a Raman-spektrumban növekvő csúcspozíció-változást eredményez; SHARP & DE CARLI 2006). DEMYK et al. (2001) TEM-vizsgálatai alapján besugárzás hatására az olivinben kialakul egy amorf, ill. kristályos+amorf doménekből álló réteg. A Mg/Si-arány 1,69-ről 1,56-ra csökken az itt alkalmazott 3. besugárzásunkhoz hasonló 10¹⁷ ion/cm₂ fluxus esetén. HAMILTON (2010) alapján nálunk a Mg-vesztés 13%-ra becsülhető az IR-csúcsok alapján (Fo93-ről Fo80-ra változott az utolsó besugárzás után). A besugárzást követően az olivin és a piroxén infravörös spektrumokban a kisebb csúcsok eltűnése szintén amorfizációra utal. A Raman-spektroszkópiában piroxén esetében a 667 cm⁻¹-nél kisebb csúcs eltűnését figyeltük meg, míg olivin esetében az R1/8 spektrumban a 844 cm⁻¹-es csúcs tűnt el. A besugárzással összefüggő amorfizációs változásokat DEMYK et al. (2001) írták le olivin esetében. BRUNETTO et al. (2020) megfigyelték, hogy a besugárzással kapcsolatos amorfizáció csökkenő csúcshintenzitást, valamint a szilikátoknál a kisebb csúcsok eltűnését eredményezi. Hasonlóan az ő megfigyeléseikhez, a mi IR-spektrumainkban is mutatkozik a besugárzást követően a csúcsok csökkenő intenzitása és a kisebb csúcsok eltűnése: piroxén: 658-661 cm⁻¹, olivin: 844 cm⁻¹ (1. ábra).

Spektrális változások értelmezése

A Fe-Mg-tartalmú ásványok negatív csúcsetolódása az olivinnél: 978 cm⁻¹ (-8 cm⁻¹), 894 cm⁻¹ (-7 cm⁻¹), piroxénél: 1046 cm⁻¹ (-7 cm⁻¹), ami az IR-spektrumokban általában nemcsak a kristályszerkezet roncsolódását, hanem

a Fe-Mg-tartalom arányának változását is jelzi, ahol a negatív csúcsetolódás a magnézium veszteségére utal, ami a vas arányának növekedését eredményezi a kristályrácsban (LANTZ et al. 2015, 2017). A negatív csúcsetolódás a legtöbb mérési pontban piroxénéknél és olivineknél egyaránt azonosítható az FTIR-spektrumokban. BRUNETTO et al. (2014) a besugárzások során megfigyelték, hogy a ~870 cm⁻¹-es csúcs eltolódása jóval nagyobb (-12 cm⁻¹), mint a mátrix olivinek heterogén összetételéből származó csúcsetolódás. A szakirodalomban leírtakhoz hasonlóan, a mi IR-spektrumainkban is negatív csúcsetolódás figyelhető meg az ásványok főbb csúcsainál (I., IV. táblázat). BRUNETTO et al. (2014) H⁺, He⁺, Ar⁺ ionokkal végzett besugárzásaik során magasabb gyorsítófeszültséget (60-400 keV) alkalmaztak, amely nagyobb változást eredményezett a nagyobb méretű ionok kristályrácsba való beépülése miatt. Kísérleteinkben a besugárzási energia minden egyes besugárzás után növekvő fluxussal, 1 keV feszültséggel, protonokkal (H⁺) történt. A harmadik besugárzás során, 10¹⁷ ion/sec/cm² fluxussal, Raman-spektroszkópiában a fő csúcsok pozitív csúcsetolódása és a mellécsúcsok eltűnése volt megfigyelhető, amely inkább az amorfizációval hozható összefüggésbe. A csúcsok eltűnése, valamint a csúcspozíciók változásának növekedése a kristályrács torzulásához köthető (rácsállandók változása – térrövidülés, hosszabbodás, helyettesítés, SiO₄ tetraéderek torzulása a kristályrácsban belül; SHARP & DE CARLI 2006).

A Raman-spektrumok a fő- és mellécsúcspozíciók növekedését mutatják, ami az olivin és a piroxén amorfizációját jelzi. Néhány esetben a besugárzást követően bizonyos kisebb sávok eltűnése is megfigyelhető (olivinnél: 844 cm⁻¹, piroxénél: 658 cm⁻¹), ami az amorfizációval hozható összefüggésbe.

BRUNETTO et al. (2006) szerint a szilikátok (piroxén és

IV. táblázat. A besugárzást követő átlagos Raman- és IR-csúcseltolódás, valamint az FWHM változása az olivinek és a piroxének esetében

Table IV. Average Raman and IR peak position and FWHM changes by irradiations for olivine and pyroxene minerals

| Ásvány | Raman-csúcseltolódás | Raman-FWHM-változás | IR-csúcseltolódás | IR-FWHM-változás |
|---|---|---|-----------------------|-----------------------|
| Olivin fő csúcsok: 820, 840 cm^{-1} - Raman, 894 cm^{-1} - FTIR | +3 cm^{-1} (820 cm^{-1}), +3,2 cm^{-1} (840 cm^{-1}) | +5 cm^{-1} (820 cm^{-1}), +4,2 cm^{-1} (840 cm^{-1}) | -24 cm^{-1} | -4.2 cm^{-1} |
| Piroxén fő csúcsok: 1010 cm^{-1} - Raman, 1046 cm^{-1} - FTIR | +3,6 cm^{-1} | +5,2 cm^{-1} | -6,5 cm^{-1} | -6 cm^{-1} |

olivin) progresszív amorfizálódást mutatnak az ionokkal való rugalmas ütközések következtében. Az amorfizáció mértéke függ az ion méretétől, és Ar^+ bombázás esetén erőteljesebb, mint H^+ ionok esetében. Ennek következményeként a csúcspozíciók alacsonyabb hullámszámok felé tolnak el a cm^{-1} skálán (ami pozitív csúcseltolódás μm -ben), miközben az infravörös csúcsok intenzitása csökken. Az IR- és Raman-méréseinkben hasonlóan amorfizációt tapasztaltunk, ami az FWHM-értékek növekedésében, a mellékcúcsok eltolódásának fokozódásában vagy eltűnésében, valamint a főcsúcs intenzitásának csökkenésében nyilvánult meg a besugárzást követően, ezek hasonlóan megfigyelhetők BRUNETTO et al. (2020) munkájában is.

A legtöbb piroxén és olivin IR-főcsúcsjainak negatív csúcseltolódása összhangban van más kutatások eredményeivel (LANTZ et al. 2015, 2017), azonban a Raman-spektrumokban általunk megfigyelt pozitív csúcseltolódást más munkák nem írták le besugárzás után. HEYMANN & HÖRZ (1990) ugyanakkor növekvő Raman-csúcseltolódást észleltek a földpát SiO_4 tetraédereinek a kristályrács sokkdeformációja miatt bekövetkező torzulása nyomán. Esetünkben tehát a pozitív csúcseltolódás inkább a besugárzás okozta kristályrácszavarokkal magyarázható, nem a sokkhatás következményeként fellépett rácszavarokkal. A növekvő csúcseltolódás az amorfizációval, míg a csökkenő csúcseltolódás a kristályszerkezetből származó magnéziumvesztéssel hozható összefüggésbe, ami a szakirodalomban is leírt jelenség (LANTZ et al. 2017, BRUNETTO et al. 2020). A pontos összetételváltozás számszerűsítése nem egyszerű, ezzel kapcsolatban olivin és piroxén besugárzás utáni Mg-vesztését azonosította TEM-mérésekkel WEBER et al. (2020). A besugárzás helyén amorf szilikátréteget és nanovasszemcséket is találtak, továbbá üreges szerkezet is mutatkozott. A változás során fellépett mellékcúcsok eltűnése és az FWHM növekedése a besugárzás kristálytani rendezetlenségéhez köthető, amit kationvesztésből eredő rácsállandó-változás okoz. LANTZ et al. (2017) szerint a besugárzás után 20% Mg-vesztés mutatkozott, a Fo50–55 összetételű olivin a besugárzás után Fo30–35% összetételű lett.

DURBEN et al. (1993) szerint az olivin pozitív csúcseltolódása a dimerizációra utal, ami az SiO_4 tetraéderek polimerizációját jelenti, amely során SiO_2 -molekulák képződnek, és ez metastabil állapotot hoz létre az olivin

kristályrácsában. Ezt a jelenséget a 2. és 3. besugárzást követően figyeltük meg Raman-spektrumainkban. Az SiO_4 tetraéderek polimerizációja a kristályszerkezet rendezetlenségét eredményezi, mivel azok SiO_2 -molekulákká alakulnak. Ezt a folyamatot kezdetben pozitív csúcseltolódás és a FWHM növekedése kíséri. A csúcseltolódás a besugárzások intenzitásának növekedésével párhuzamosan fokozódott, és a fellépett pozitív csúcseltolódás az olivin és a piroxén amorfizációját jelzi.

A kisebb csúcsok eltűnése és az FWHM növekedése a besugárzással összefüggő amorfizáció eredménye lehet (DEMYK et al. 2004), akárcsak a csúcspozíció növekedése (pozitív csúcseltolódás), amelyet sokkmetamorfózis okozta szerkezeti változásként írtak le ásványokban (VAN DE MOORTELE et al. 2007, JOHNSON et al. 2003, SHARP & DE CARLI 2006).

Végekötvetkezések

Az NWA 10580 CO3 szenes kondrit esetében a 10^{11} , 10^{14} és 10^{17} ion/ cm^2 fluensekkel, 1 keV H^+ ionokkal végzett besugárzás besugárzás előtti és utáni állapotokat elemeztük. A vizsgálat során összesen 8 pont változását követtük IR- és Raman-spektroszkópiával.

A piroxén (660 cm^{-1}) és az olivin (978 cm^{-1}) kisebb intenzitású csúcsainak eltűnése az IR-spektrumokban amorfizációra utal, míg az FWHM-növekedése szintén a kristályszerkezet rendezetlenségét jelzi az infravörös tartományban.

Az olivin (880 cm^{-1}) és a piroxén (1050 cm^{-1}) fő IR csúcsainak alacsonyabb hullámszám irányába történő eltolódása (cm^{-1} -ben) Mg-vesztésre utal, amely összhangban áll más szerzők kozmikus sugárzást modellező kísérleteinek eredményeivel. A Mg-vesztés markánsabban mutatkozik meg az infravörös spektrumokban, mint a Raman-spektrumokban, mivel az olivin főbb csúcsai és a legtöbb piroxén itt negatív csúcseltolódást mutat.

A piroxének és az olivinek Raman-spektrumaiban a csúcspozíció növekedése, valamint az FWHM-értékek emelkedése szintén a besugárzást követő szerkezeti rendezetlenségét jelzi. A kalcit eltűnése a Raman-spektrumban azonosítható a besugárzás után.

Vizsgálataink során elsőként tapasztaltuk a pozitív csúcsetolódás (főleg Raman-spektrumokban), az FWHM-értékek növekedése, valamint az ásványi fázisok kisebb csúcsainak eltűnése formájában jelentkező szerkezeti átalakulásokat (Raman- és infravörös spektroszkópiai mérésekben egyaránt).

Az újonnan bemutatott Raman-adatok kiegészítik és alátámasztják azokat a korábbi vizsgálatokat, amelyekben a nem besugárzott meteorit ásványok sokkdeformációjától végbemenő rácsszerkezeti változásokat írták le. Ez rámutat a besugárzás és a sokkhatás által kiváltott kristályszerkezeti módosulások közötti hasonlóságokra és összefüggésekre.

A szilikátásványok azonosításához a célpontok (pl. kisbolygók) esetében az ásványok fő csúcsait (Si-O-kötések nyúlási vibrációja) tudjuk használni (IR: olivinben 894 cm^{-1} , piroxénben 1046 cm^{-1} ; Raman: olivin $820, 850\text{ cm}^{-1}$ olivinben, 1009 cm^{-1} a piroxénnél), azok tartanak ki legtovább. A besugárzásra leginkább a kation-kötéses szimmetrikus/asszimmetrikus nyúlási vibrációja a legérzékenyebb,

ott láthatunk csúcsetlűnéseket erősebb besugárzás esetén (700 cm^{-1} alatti értékek) értékek. A rosszul kristályosodott, részben amorf fázisok érzékenyebbek a besugárzásra, ott az SiO_4 tetraéderek dimerizációja miatt a kötések felbomlanak, így pl. a földpátúveg már a második besugárzás után eltűnt. Szilikát tetraéder dimerizációjának hatására ilyen csúcsetlűnést tapasztalhatunk az olivin dubletjében: a 848 cm^{-1} csúcs eltűnik a 3. besugárzás során a Raman-spektrumban – mindezeket az infravörös kamerák sávbeosztásánál érdemes használni.

Köszönetnyilvánítás

A kutatómunkát az NKFIH K_138594 projekt támogatta, valamint az Europlanet 2024 RI és az Európai Unió Horizon 2020 Research Innovation Programme programja támogatta (No. 871149). A kutatás ideje alatt J. Z. Bolyai János Kutatási Ösztöndíjban részesült. Köszönet a bírálóknak építő jellegű kritikái megjegyzéseikért.

Irodalom – References

- BREITENFELD, L. B., DYAR, M. D., CAREY, C. J., TAGUE JR, T. J., WANG, P., MULLEN, T. & PARENTE, M. 2018: Predicting olivine composition using Raman spectroscopy through band shift and multivariate analyses. – *American Mineralogist* **103(11)**, 1827–1836. <https://doi.org/10.2138/am-2018-6291>
- BRUNETTO, R., VERNAZZA, P., MARCHI, S., BIRLAN, M., FULCHIGNONI, M., OROFINO, V. & STRAZZULLA, G. 2006: Modeling asteroid surfaces from observations and irradiation experiments: The case of 832 Karin. – *Icarus* **184(2)**, 327–337. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2006.05.019>
- BRUNETTO, R., LANTZ, C., LEDU, D., BAKLOUTI, D., BARUCCI, M.A., BECK, P., DELAUCHE, L., DIONNET, Z., DUMAS, P., DUPRAT, J. & ENGRAND, C. 2014: Ion irradiation of Allende meteorite probed by visible, IR, and Raman spectroscopies. – *Icarus* **237**, 278–292. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.04.047>
- BRUNETTO, R., LOEFFLER, M. J., NESVORNÝ, D., SASAKI, S. & STRAZZULLA, G. 2015: Asteroid Surface Alteration by Space Weathering Processes. – In: MICHEL, P. et al. (ed.): *Asteroids IV*. University of Arizona Press, 597–616. <https://dx.doi.org/10.1353/book.43354>
- BRUNETTO, R., LANTZ, C., NAKAMURA, T., BAKLOUTI, D., LE PIVERT-JOLIVET, T., KOBAYASHI, S. & BORONDICS, F. 2020: Characterizing irradiated surfaces using IR spectroscopy. – *Icarus* **345**, p.113722. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2020.113722>
- CHAPMAN, C. R. 2004: Space weathering of asteroid surfaces. – *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* **32**, 539–567. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.32.101802.120453>
- DEMEO, F. E., BURT, B. J., MARSET, M., POLISHOOK, D., BURBINE, T. H., CARRY, B., BINZEL, R. P., VERNAZZA, P., REDDY, V., TANG, M. & THOMAS, C. A. 2022: Connecting asteroids and meteorites with visible and near-infrared spectroscopy. – *Icarus* **380**, 114971. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2022.114971>
- DEMYK, K., CARREZ, P., LEROUX, H., CORDIER, P., JONES, A. P., BORG, J., QUIRICO, E., RAYNAL, P. I. & D’HENDECOURT, L. 2001: Structural and chemical alteration of crystalline olivine under low energy He⁺ irradiation. – *Astronomy & Astrophysics* **368(3)**, L38–L41. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20010208>
- DEMYK, K., D’HENDECOURT, L., LEROUX, H., JONES, A. P. & BORG, J. 2004: IR spectroscopic study of olivine, enstatite and diopside irradiated with low energy H and He ions. – *Astronomy & Astrophysics* **420(1)**, 233–243. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20040091>
- DUKES, C. A., BARAGIOLA, R. A. & MCFADDEN, L. A. 1999: Surface modification of olivine by H⁺ and He⁺ bombardment. – *Journal of Geophysical Research: Planets* **104(E1)**, 1865–1872. <https://doi.org/10.1029/98JE02820>
- DURBEN, D. J., McMILLAN, P. F. & WOLF, G. H. 1993: Raman study of the high-pressure behavior of forsterite (Mg₂SiO₄) crystal and glass. – *American Mineralogist* **78(11–12)**, 1143–1148.
- HAMILTON, V. E. 2000: Thermal infrared emission spectroscopy of the pyroxene mineral series. – *Journal of Geophysical Research: Planets* **105(E4)**, 9701–9716. <https://doi.org/10.1029/1999JE001112>
- HAMILTON, V. E. 2010: Thermal infrared (vibrational) spectroscopy of Mg–Fe olivines: A review and applications to determining the composition of planetary surfaces. – *Geochemistry* **70(1)**, 7–33. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2009.12.005>
- HEYMANN, D. & HÖRZ, F. 1990: Raman-spectroscopy and X-ray diffractometer studies of experimentally produced diaplectic feldspar glass. – *Physics and Chemistry of Minerals* **17(1)**, 38–44. <https://doi.org/10.1007/BF00209224>
- HUANG, E., CHEN, C. H., HUANG, T., LIN, E. H. & XU, J. A. 2000: Raman spectroscopic characteristics of Mg–Fe–Ca pyroxenes. – *American Mineralogist* **85(3–4)**, 473–479. <https://doi.org/10.2138/am-2000-0408>
- JOHNSON, J. R., HÖRZ, F. & STAID, M. I. 2003: Thermal infrared spectroscopy & modeling of experimentally shocked plagioclase feldspars. – *American Mineralogist* **88(10)**, 1575–1582. <https://doi.org/10.2138/am-2003-1020>

- KAŇUCHOVÁ, Z., BODUCH, P., DOMARACKA, A., PALUMBO, M. E., ROTHARD, H. & STRAZZULLA, G. 2017: Thermal and energetic processing of astrophysical ice analogues rich in SO₂. – *Astronomy & Astrophysics* **604**, A68. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201730711>
- KERESZTURI, Á., BIRI, S., GYOLLAI, I., JUHÁSZ, Z., KIRÁLY, Cs., RÁCZ, R., REZES, D., SULIK, B., SZABÓ, M., SZALAI, Z., SZÁVAI, P. & SZKLENÁR, T. 2024: Raman spectroscopy analysis of artificial space weathering effects of NWA 10580 CO3 meteorite. – *Meteoritics and Planetary Sciences* **59(10)**, 2851–2864. <https://doi.org/10.1111/maps.14255>
- KERESZTURI, Á., GYOLLAI, I., BIRI, S., JUHÁSZ, Z., KIRÁLY, Cs., PÁL, B. D., RÁCZ, R., REZES, D., SULIK, B., SZABÓ, M., SZALAI, Z. & SZÁVAI, P. 2025: Evaluation of simulated space weathering-based meteorite alteration and potential influence on mechanical deformation of rubble pile asteroids. – *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* **12**, 1427387. <https://doi.org/10.3389/fspas.2025.1427387>
- KOVÁCS I., UDVARDI B., FALUS Gy., FÖLDEVÁRI M., FANCSIK T., KÓNYA P., BODOR E. R., MIHÁLY J., NÉMETH Cs., CZIRJÁK G., ÓSI A., VARGÁNÉ BARNA Zs., BHATTOA, H. P., SZEKANECZ Z. & TURZA S. 2015: AZ ATR FTIR spektrometria gyakorlati alkalmazása néhány – elsősorban földtani – esettanulmány bemutatásával. – *Földtani Közlemények* **145**, 173–192. <https://ojs.mtak.hu/index.php/foldtanikozlony/article/view/116>
- KOVÁCS, I., UDVARDI, B., PINTÉR, Zs., HIDAS, K., KUTASSY, L., FALUS, Gy., LENDVAY, P., TÖRÖK, I., ZELEI, T., FANCSIK, T., GÁL, T., MIHÁLY, J., NÉMETH, Cs., INGRIN, J., XIA, Q., HERMANN, J., STALDER, R., PERUCCHI, A., KAMARÁS, K. & SZEKRÉNYES, Zs. 2014: A Protocol, a standard and a (PULD) database for quantitative micro-FTIR measurements of water in nominally anhydrous minerals: an update. – *Geophysical Research Abstracts* 16 Paper: 14309.
- KRÄMER RUGGIU, L., BECK, P., GATTACCECA, J. & ESCHRIG, J. 2021: Visible-infrared spectroscopy of ungrouped and rare meteorites brings further constraints on meteorite-asteroid connections. – *Icarus* **362**, 114393. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2021.114393>
- KUEBLER, K. E., JOLLIFF, B.L., WANG, A. & HASKIN, L. A. 2006: Extracting olivine (Fo–Fa) compositions from Raman spectral peak positions. – *Geochimica et Cosmochimica Acta* **70(24)**, 6201–6222. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.07.035>
- LAFUENTE B., DOWNS R. T., YANG H. & STONE, N. 2015: The power of databases: the RRUFF project. – In: ARMBRUSTER, T. & DANISI, R. (eds): *Highlights in Mineralogical Crystallography*, Berlin, De Gruyter, 1–30.
- LANGE, T. P., SZABÓ Cs., LIPTAI N., PATKÓ L., GELENCSEŔ O., ARADI L. E. & KOVÁCS I. J. 2019: A földköpeny reológiai kutatása: mennyiségi fourier transzformációs infravörös spektrometria alkalmazása egy Persány-hegységi xenolit példáján. – *Földtani Közlemények* **149(3–4)**, 233. <https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2019.149.3.233>
- LANTZ, C., BRUNETTO, R., BARUCCI, M. A., DARTOIS, E., DUPRAT, J., ENGRAND, C., GODARD, M., LEDU, D. & QUIRICO, E. 2015: Ion irradiation of the Murchison meteorite: Visible to mid-infrared spectroscopic results. – *Astronomy & Astrophysics* **577**, A41. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201425398>
- LANTZ, C., BRUNETTO, R., BARUCCI, M. A., FORNASIER, S., BAKLOUTI, D., BOURÇOIS, J. & GODARD, M. 2017: Ion irradiation of carbonaceous chondrites: A new view of space weathering on primitive asteroids. – *Icarus* **285**, 43–57. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.12.019>
- LAZZARIN, M., MARCHI, S., MOROZ, L. V., BRUNETTO, R., MAGRIN, S., PAOLICCHI, P. & STRAZZULLA, G. 2006: Space weathering in the main asteroid belt: The big picture. – *The Astrophysical Journal* **647(2)**, L179. <https://doi.org/10.1086/507448>
- MOLNÁR K., ARADI L. E., OBBÁGY G., KÖVÉR Sz., FODOR L., BENKÓ Zs. & SZABÓ Cs. 2021: Szenes anyagok maximális átalakulási hőmérsékletének meghatározása Raman-spektroszkópiai mérésekkel: standardizálás és esettanulmány az Aggtelek–Rudabányai-hegységéből. – *Földtani Közlemények* **151/1**, 37–50. <https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2021.151.1.37>
- SHARP, T. G. & DECARLI, P. S. 2006: Shock effects in meteorites. – *Meteorites and the early solar system II*, **943**, 653–677.
- TÓTH, J., UDVARDI, B., KOVÁCS, I., FALUS, Gy., SZABÓ, Cs., TROSKOT-ČORBIĆ, T. & SLAVKOVIĆ, R. 2012: Analytical development in FTIR analysis of clay minerals. – *MOL Scientific Magazine* **1**, 52–57.
- VAN DE MOORTELE, B., REYNARD, B., McMILLAN, P. F., WILSON, M., BECK, P., GILLET, P. & JAHN, S. 2007: Shock-induced transformation of olivine to a new metastable (Mg, Fe) 2SiO₄ polymorph in Martian meteorites. – *Earth and Planetary Science Letters* **261(3–4)**, 469–475. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.07.030>
- VERNAZZA, P., FULVIO, D., BRUNETTO, R., EMERY, J. P., DUKES, C. A., CIPRIANI, F., WITASSE, O., SCHAIBLE, M. J., ZANDA, B., STRAZZULLA, G. & BARAGIOLA, R. A. 2013: Paucity of Tagish Lake-like parent bodies in the Asteroid Belt and among Jupiter Trojans. – *Icarus* **225(1)**, 517–525. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.04.019>

Kézirat beérkezett: 2025. 05. 25.